

## ارتفاع درجة حرارة الموصلية الفائقة المنخفضة الحرارة<sup>(\*)</sup>

يتحدى ثنائي بوريد المغنيزيوم الأفكار المعهودة حول ما يُكون موصلًا فائقاً جيداً. فهو يصبح موصلًا فائقاً عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً تبلغ 40 درجة كلفن - ويعود ذلك بتطبيقات متنوعة.

C.P. <ـ L. S.ـ> ـ بـ دـ كـوـ

إلى أرشيف الأبحاث المعدة للنشر arxiv.org وكان لحدوث هذه الفورة من النشاط عدة أسباب. أولاً، بمجرد أن تكتشف كيف سيكون صنع المركب  $MgB_2$  النقى نسبياً أمراً بسيطاً إلى حد ما. ثانياً، كان فيزيائيو المادة الكثيفة في عام 2001 على اتصال مع بعضهم بعضاً بوساطة الإنترنت أفضل من أي وقت مضى. وقد شكل هذان العاملان، إضافةً إلى الأمل بالحصول على موصل فائق بسيط جيد جدًّا ذي درجة حرارة تحول عالية، مزيجاً فكريًا متفرجاً.

### تأكيد الاكتشاف<sup>(\*\*)</sup>

انتشر نبأ إعلان «أكيميتسو» في البداية عن طريق الحديث المتداول والبريد الإلكتروني. ولم تكن هناك ورقة بحث أو مسودة إلكترونية. وحين وصل النبأ إلى مجتمعتنا بعد أيام قليلة من اللقاء، طرحت سلسلة من الأسئلة: هل بإمكاننا صنع قطع صلبة عالية النقاء من هذه المادة؟ (المركب  $MgB_2$  التجاري يكون على شكل مسحوق غير نقى تماماً). وهل تحول هذه المادة بالفعل إلى موصل فائق بالقرب من درجة الحرارة 40 كلفن؟ (خلال عقدين من الزمن

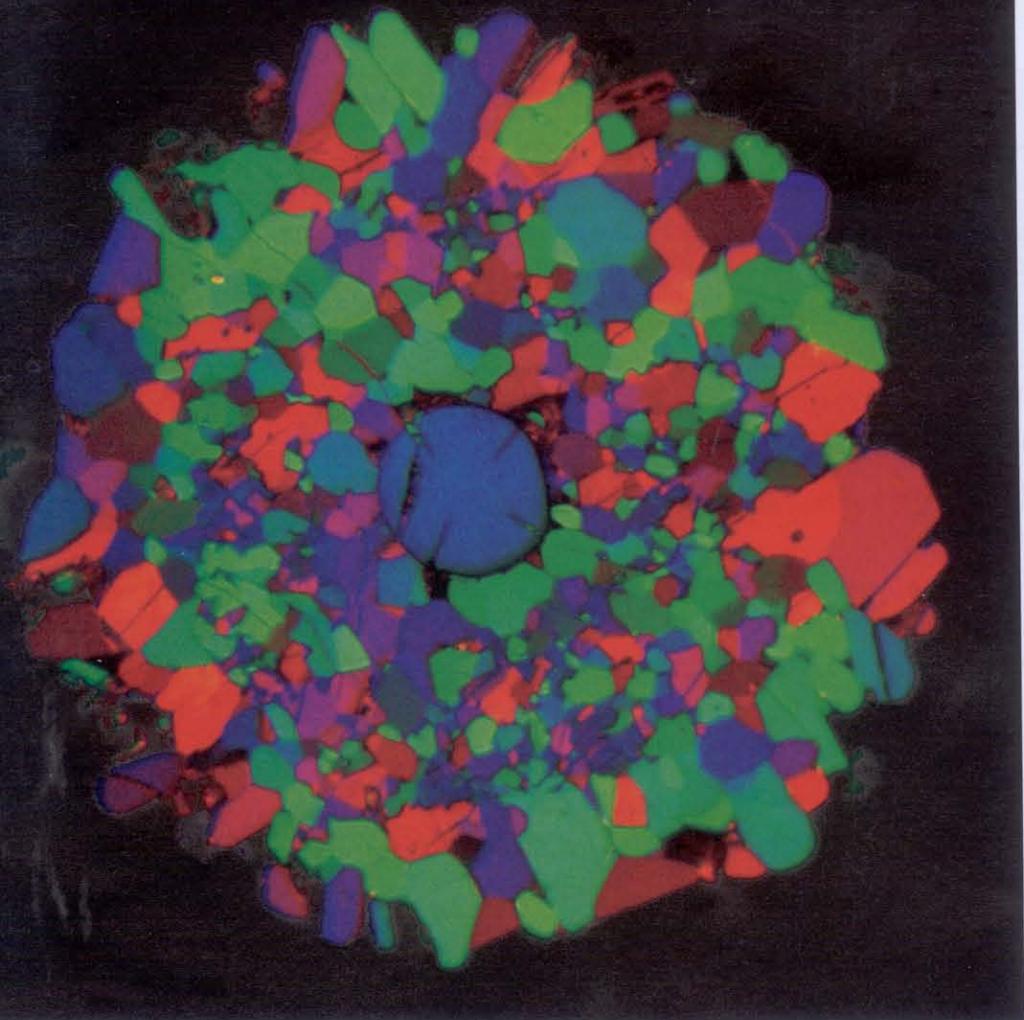
التطبيقات الممكنة المعاينة الفائقة الموصلية وخطوط نقل الطاقة الكهربائية. بخلاف الموصلات الفائقة العالية درجة الحرارة (وهي مواد من أكسيد النحاس تتصرف بالموصلية الفائقة عند درجات حرارة عالية تبلغ 130 كلفن)، يبدو أن المركب  $MgB_2$  موصل فائق معهود وإن يكن نوعاً مختلفاً. لقد طور فيزيائيون، أثناء سعيهم الذي امتد عقوداً من الزمن للحصول على موصلات فائقة، قواعد على أساس الخبرة والممارسة<sup>(1)</sup> فيما يتعلق بنوع تركيبات العناصر التي ينبغي اختبارها. إضافةً إلى ذلك فقد ظن العديد منهم أن الدرجة 23 كلفن كانت قريبة من درجة حرارة التحول العظمى الممكنة بالنسبة إلى موصل فائق معهود. لكن المركب  $MgB_2$  كان مفاجأة كبيرة حين تحدي هذه القواعد وتجاوز الحاجز متوصلاً إلى درجة حرارة تحول أعلى.

كانت السرعة التي نما فيها فهم المركب  $MgB_2$  سرعة مذهلة حقاً. كان «أكيميتسو» [من جامعة أوبياما كاكويون في طوكيو] قد أعلن الاكتشاف أثناء لقاء جرى في منتصف الشهر الأول من عام 2001. وبعد شهرين قدمت حول الموضوع 100 مداخلة (مدة الواحدة منها دقيقة) في لقاء الجمعية الفيزيائية الأمريكية السنوي، كما أرسل بالبريد الإلكتروني أكثر من 70 بحثاً

تخيل أنك بينما كنت تتجول في باحة منزلك الخالية تشعر فجأة على عرق ذهب في إحدى الزوايا التي كنت تعتقد أنك تعرفها جيداً؛ أو تخيل كيف سيكون شعور صاحب أرض حين يبدأ النفط بالبقاء منها. لقد ساد شعور مماثل من الإثارة المشوية بالشك لدى مجتمع العاملين في فيزياء الحالة الصلبة في الأسابيع الأولى من عام 2001 حين أعلن باحثون أن ثنائي بوريد المغنيزيوم ( $MgB_2$ ) يصبح موصلًا فائقاً - أي يوصل الكهرباء دون مقاومة تذكر - عند درجات حرارة قريبة من 40 درجة كلفن.

درس هذا المركب البسيط في الخمسينيات من القرن العشرين ثم وضع على الرف في بعض المختبرات لأغراض دينامية مختلفة عقوداً عدة دون أن يفطن أحد إلى صفاتِه الخفية البالغة الأهمية. ومع أن الدرجة 40 كلفن (أو 233 درجة سيلزية) يمكن أن توحى بأنها منخفضة جداً، إلا أنها ضعف الرقم القياسي تقريباً للمركبات المصنوعة من المعادن (نحو 23 كلفن للسبائك التي أساسها التيتانيوم المستخدمة على نطاق واسع في البحث والصناعة). ويمكن أن يتم التحول إلى موصل فائق عند درجة حرارة عالية إلى هذا الحد بوساطة تقانات تكلف أقل كثيراً من تلك اللازمة لإحداث الموصلية الفائقة في سبائك التيتانيوم. ومن

مقطع عرضي لسلك من ثنانئي بوريد المغنيزيوم، يُبيّن أن السلك كثيف مثُل في المثلة ومكون من حبيبات صغيرة غير موجهة تعكس الضوء بصورة مختلفة، محدثة الوانًا متعددة. ومثل هذا السلك مفيد في البحث الأساسي في الموصليات الفائقة للمواد. إن قطر السلك هو 0.14 مليمتر.



كان يُعلن عن مركبات ذات درجة حرارة تحول استثنائية لم يتمكن باحثون آخرون من تكرار صنعها). إذا كان المركب  $MgB_2$  موصلًا فائقاً بالفعل، فهل بإمكاننا اكتشاف آلية موصليته الفائقة؟ وأخيراً، هل نستطيع تحديد بعض خواص هذا المركب الأساسية؟ ولحسن الحظ لنا جميعاً كانت الإجابة نعم عن كل سؤال من هذه الأسئلة.

مع إشاعة اكتشاف <أكيميتسو> بدأت فترة رائعة حافلة بالإثارة بالنسبة إليها وإلى مجموعات بحثية أخرى. ولما كانت

وتَأكِّدنا من أنه موصل فائق طرحتنا السؤال الملح التالي: هل كان موصلًا فائقًا من النوع القديم الذي يمكن تفسير سلوكه بوساطة النظرية الراسخة منذ زمن طويل المسماة نظرية النوع BCS (من الأحرف الأولى من الأسماء الأخيرة لمكتفيها) أم أنه مثال على نوع إضافي غريب [انظر الإطار في الصفحة 74] فإذا تبين أنه من نوع غريب فسيكون ذلك اكتشافاً علمياً مهماً. أما إذا تبين أنه موصل فائق عادي من النوع BCS فإن درجة حرارة التحول المرتفعة تتطلب تفسيراً، وستكون فقط أفاق استخدام هذه المادة في التطبيقات أكثر تشجيعاً.

اعتقد بعض الباحثين، لعدة أسباب، أن المركب  $MgB_2$  ليس موصلًا فائقًا عاديًا من النوع BCS. أولاً، قبل اكتشاف الموصلات الفائقة العالية درجة الحرارة عام 1986، مر عقدان كانت درجة حرارة التحول العظمى خاللهما لا تترجح عن الدرجة 20 كلفن

مع شيء من البورون المسحوّق داخل إبراء من التنتاليوم، الخامّل، المغلق بشكل محكم ونعرضهما لدرجة حرارة عالية إلى الحد الذي ينتحر فيه المغنيزيوم لكن دون أن يغلي (النقل 950 درجة سيلزية). إن المغنيزيوم ضغط بخار عاليًا نسبيًا - إذ يوجد ثلث ضغط جوي من بخار المغنيزيوم في توازن مع المعدن السائل عند درجة الحرارة 950 سيلزية. وقد توقّعنا أن هذا البخار الكثيف يمكن أن يتغلغل داخل البورون الصلب فتنتج حبيبات من المركب  $MgB_2$ . وبالفعل وجدنا أن هذه العملية أنتجت في نحو ساعتين فقط المركب  $MgB_2$  العالي النقاء جداً على شكل حبيبات مبلدة مخلّلة (مثل الحجر الرملي). خلال ثلاثة أيام من سماع الإشاعات صنعوا هذه الحبيبات وتمكنوا من تأكيد موصليتها الفائقة عند درجة حرارة قريبة من 40 كلفن.

بعد أن عرفنا كيف نصنع المركب  $MgB_2$

مجموعة اشتقت بدراسة الخواص الفيزيائية للمركبات المعدنية، فقد قمنا بمجرد أن سمعنا بالتقرير بإفراغ جميع أفرانا من التجارب التي كانت تجري فيها وبدأنا نحاول صنع المركب  $MgB_2$ . كان صنع المركب عملاً يتطلّب براعة في البداية. فهو مثال على المركب المعدني المؤلف من عنصرين أو أكثر من العناصر المعدنية. لم تكن أبسط الطرق لصناعة المركبات المعدنية - وهي صهر المعادن معاً - ممكنة في هذه الحالة لأن للعنصرتين درجات حرارة انصهار مختلفتين جداً: 650 درجة سيلزية للمغنيزيوم وأعلى من 2000 درجة سيلزية للبورون. ولما كان المغنيزيوم يغلي أعلى من الدرجة 1100 سيلزية تماماً فسوف يتذبذب قبل أن يتشكّل المركب، وبلغة غير علمية ستتمو للمغنيزيوم أرجل تحمله بعيداً.

إلا أن تذبذب المغنيزيوم أقوى بطريقه بديلة: بإمكاننا أن نضع قطعة من المغنيزيوم

المركب  $MgB_2$  هو على الأرجح موصل فائق تنطبق عليه النظرية BCS، وإن يكن مثلاً متطرفاً درجة حرارة تحوله أعلى بكثير من أي موصل فائق آخر. ويبدو أن التوقعات حول كون الدرجة 30 كلفن هي الحد الأعلى التقريبي للموصولة الفائقة من النوع BCS لم تكن صحيحة. كان هذا نبأ جيداً لأن التعامل مع الموصولات الفائقة المعدنية العادية من النوع BCS أسهل كثيراً، كما أن بالإمكان تشكيل أسلاك مفيدة منها بسهولة أكبر بكثير مما يمكن من الموصولات الفائقة التي أساسها أكسيد النحاس. وبالفعل تبين لمجموعتنا فجأة أن بإمكاننا صنع أسلاك المركب  $MgB_2$  ببساطة، وذلك بأن نعرض شعيرات من البورون لبخار المغنيزيوم [انظر الإطار في الصفحة المقابلة]. والفائدة من هذه الأسلاك أكبر من الفائدة من الحبيبات المبلدة في العديد من القياسات والتطبيقات مثل المغناط.

### استخدامات الموصلات الفائقة<sup>(\*\*)</sup>

الموصولة الفائقة تشكلية واسعة من التطبيقات المعاصرة، كما يمكن أن تكون لها تطبيقات أخرى في المستقبل، وذلك على الرغم من أنها لا تحدث إلا عند درجات حرارة منخفضة جداً. وتتخرج بعض هذه التطبيقات الأكثروضوحاً من مقدرة الموصلات الفائقة على نقل تيارات عالية الشدة دون خسارة في الطاقة أو تسخين بسبب المقاومة. ومثال ذلك المغناط الفائقة الموصولة التي تستطيع توليد حقول مغناطيسية تزيد على 20 تسلا (أي أشد بنحو 500 مرة من مغناطيس براد عادي). تستخدم مثل هذه المغناط الفائقة الموصولة المنخفضة درجة الحرارة (وآخرى أضعف منها) في المختبرات وفي أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي في المستشفيات.

وقد اقترح تطبيق آخر لخاصة نقل التيارات العالية هو خطوط نقل الطاقة

مع توافر اهتزاز شبكته. وكما هو الأمر بالنسبة إلى أجسام عادية مثل كأس من الزجاج أو أدوات القيثاراة، تكون للأجسام المصنوعة من مواد ذات كتلة أصغر توارات مميزة أعلى من تلك التي للأجسام المائمة المصنوعة من مواد ذات كتلة أكبر. بإمكاننا باستخدام نظير مختلف للمغنيزيوم أو البورون أن نصنع المركب  $MgB_2$  من ذرات ذات كتلة مختلفة، وهذا سيغير توافر اهتزاز الشبكة، وهذا بدوره يجب أن يغير الدرجة  $T_c$  بطريقة معينة.

للبورون نظيران مستقران موجودان في الطبيعة: هما البورون 10 والبورون 11. إن أبسط تنبؤ ينتج من النظرية BCS هو أن الدرجة  $T_c$  يجب أن تختلف بمقدار 0.85 كلفن بين عينتين من المركب  $MgB_2$  أحدهما مصنوعة من البورون 10 النقي والأخرى من البورون 11 النقي. وقد اكتشفنا باستخدام حبيباتنا المبلدة الأولى من المركب  $MgB_2$  أن الانزياح في درجة الحرارة هو 1 كلفن. ويمكن فهم حقيقة أن انزياح الدرجة  $T_c$  أكبر قليلاً من التنبؤ البسيط في إطار النظرية BCS نفسها - فهي تشير إلى أن اهتزازات البورون هي أكثر أهمية بالنسبة إلى الموصولة الفائقة من اهتزازات المغنيزيوم [انظر الإطار في الصفحة 75].

إن قرب انزياح درجة الحرارة من الانزياح المتوقع البالغ 0.85 كلفن، أظهر أن درجة حرارة التحول لموصل فائق تتناسب على نحو خاص.

تقريباً. وقد أدت هذه الحقيقة إلى أن يقترح بعض النظريين أن الدرجة 30 كلفن هي درجة الحرارة العظمى الممكنة بالنسبة إلى الموصولة الفائقة في المركبات التي تخضع لقواعد النوع BCS. صحيح أن الموصلات الفائقة العالية درجة الحرارة من أكسيد النحاس تتجاوز هذا الحد كثيراً، إلا أنه لا يعتقد أنها موصولات فائقة من النوع BCS.

ثانياً، إن درجة حرارة التحول، أو الدرجة الحرجة  $T_c$ ، للمركب  $MgB_2$  تختلف إحدى القواعد المبنية على الخبرة العملية في البحث عن مركبات معدنية ذات درجة حرارة حرجة مرتفعة وهي: كلما زاد عدد الإلكترونات المساهمة في التحول الطوري إلى حالة الموصولة الفائقة، ارتفعت درجة حرارة التحول. لكن لا المغنيزيوم ولا البورون يعطى الإلكترونات كثيرة إلى المركب  $MgB_2$  على نحو خاص.

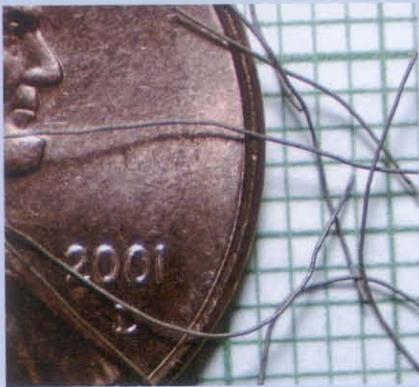
هناك اختبار تجريبي مباشر جداً يستطيع الدلالة على ما إذا كان موصل فائق يتبع النظرية BCS. فلا هتزازات «شبكة البلورة»<sup>(\*)</sup> دور مهم في النظرية. تصور أن الأيونات الثقيلة في البلورة مثبتة في مواضعها بواسطة نواips قوية (الروابط الكيميائية). وظهور الإثارات، مثل الحرارة، بصورة اهتزاز الأيونات عند توافرات مميزة. وتتبّع النظرية BCS بأن درجة حرارة التحول لموصل فائق تتناسب

### نظرة إجمالية/ ثنائي بوريد المغنيزيوم<sup>(\*)</sup>

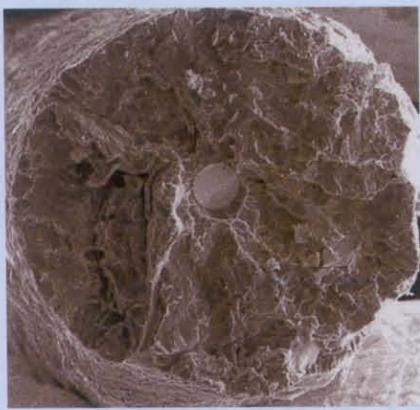
- في عام 2001 اكتشف الباحثون أن ثنائي بوريد المغنيزيوم المركب العادي ظاهرياً يتصرف بالمواضيل الفائقة عند درجة الحرارة البالغة نحو 40 كلفن، وهذه تقريباً ضعف درجة الحرارة للموصلات الفائقة الأخرى المشابهة. وترواح درجة حرارته العملية العظمى بين 20 و 30 كلفن.
- يمكن بلوغ درجة الحرارة هذه بواسطة التبريد باستخدام النبئون أو الهيدروجين السائلين أو بوساطة التبريد بدارة مغلقة. وهذه الطرق كلها أقل تكلفة بكثير وأبسط من التبريد باستخدام الهليوم السائل الذي تتطلب سبائك النيوبيوم المستخدمة على نطاق واسع في الصناعة عند درجة الحرارة القريبة من 4 كلفن.

- حين يُطعم ثنائي بوريد المغنيزيوم بالكريون أو بشوائب أخرى يصبح معدلاً لسبائك النيوبيوم أوثيق على فيها في الاحتفاظ بموصيلاته الفائقة لدى وجود حقول مغناطيسية ولدى مرور تيار كهربائي فيه. تشمل التطبيقات المكانة المغناط الفائقة الموصولة وخطوط نقل الطاقة الكهربائية والمكاشيف الحساسة للحقول المغناطيسية.

## صنع الأسلاك<sup>(\*)</sup>



صنعت الأسلاك بجعل بخار المغنيزيوم يتفاعل مع شعيرات البورون.



لقطة لقطع عرضي لقطعة من سلك من ثنائي بوريد المغنيزيوم تظهر قلبًا مركبًا من بوريد القنفستين قطره 0.015 مليمتر.

خلال أسبوعين بعد الإعلان عن أن المركب  $MgB_2$  موصل فائق ابتكرنا تقنية لصنع قطع سلكية من هذا الموصل الفائق الرائع. يمكن تشكيل المركب  $MgB_2$  بوساطة جعل بخار المغنيزيوم يتفاعل مع البوoron. وهذه عملية يمكن أن تجرى خلال ساعات عند درجات حرارة قريبة من الدرجة 1000 سيلزيو: فالبوoron يمتص بخار المغنيزيوم من الجو المحيط به ويتحول إلى المركب  $MgB_2$  (ويتنفس جراء ذلك انتفاخاً مذهلاً). تخيل أسفنجية جافة تمتص بخار الماء من الهواء في يوم شديد الرطوبة. تتبع هذه العملية باستخدام ألياف البوoron التي يمكن شراؤها بأطوال تبلغ مئات الأمتار، وقد طبقت على شعيرات كانت قطراتها في البداية تتراوح بين 0.1 و 0.3 مليمتر.

ومثل هذه القطع من الأسلاك لها فائدة كبيرة في البحوث الأساسية لأنها تتبع قياس الخواص الفيزيائية الذاتية للمركب  $MgB_2$ . وقبل التمكن من استخدام مثل هذه القطع من الأسلاك في التطبيقات العملية ينبغي أن يكون لها غلاف موصل على درجة من المرونة يؤمن لها المثانة الميكانيكية (يفيد الغلاف الموصل أيضاً في أنه يوصل التيار في حال توقيف الموصىلة الفائقة فيحول بذلك دون تسخين المركب  $MgB_2$  تسخيناً مؤذياً)، لكن لم يطور بعد غلاف مناسب.

وهناك طريقة أخرى أكثر شيوعاً لصنع الأسلاك تدعى مسحوق في أنبوب powder in a tube. في هذه الطريقة يوضع مسحوق المغنيزيوم والبوoron أو مسحوق المركب  $MgB_2$  داخل أنبوب، ثم يسحب الأنبوب ليتحول إلى سلك ويجرى بعد ذلك تلدين السلك ليصبح بنية صلبة. وقد أنتجت هذه التقنية عينات للبحث تتراوح أطوالها بين عشرات ومئات الأمتار.

وعلى الرغم من كون المركب  $MgB_2$  موصلًا فائقاً حديث العهد، فإن الشركات اهتمت به وهي تعمل في سبيل طرحه تجاريًا. ومن الأمثلة على ذلك الشركة Diboride والشركة Hyper Tech Research Conductors صنعت أسلاك المركب  $MgB_2$  وتحسين خواصها، وكذلك الشركة Specialty Materials وهي شركة أكبر ولديها خبرة في صنع شعيرات البوoron.

اهتمامًا خاصًا بالطور المختلط للموصل الفائق الذي يخرب فيه حقل مغناطيسي الموصىلة الفائقة تجرباً جزئياً - لأن المادة تكون في هذا الطور المختلط في معظم التطبيقات الواقعية. لا تولد الحقول المغناطيسيّة الضعيفة الحالة المختلطة لأن الموصل الفائق يطرد مثل هذه الحقول من داخله ويُبقى موصلًا فائقًا. أما عند حقول متوسطة الشدة فتسمح المادة للحقل المغناطيسي بالتفوز فيها على شكل أنابيب صغيرة من التدفق المغناطيسي تعرف باسم الدوّامات vortices. ولا يكون ما يدخل هذه الأنابيب موصلًا فائقًا لكن المادة خارجها تبقى موصلة فائقة.

يظل الطور المختلط يُبدي العديد من

حرارته الحرجة 20 كلفن، وهذا يعني أنه يجب أن يُبرد بوساطة الهليوم السائل، وهذا الأمر مكلف وعلى درجة من الصعوبة.

يبدي مجتمع البحث التطبيقي اهتماماً بالمركب  $MgB_2$  لأن تبريده إلى درجة حرارة التشغيل أسهل من تبريد المركبات التي أساسها سبائك النبوبيوم المستخدمة حالياً والتي درجة حرارتها الحرجة أخفض، إذ يمكن تبريد المركب  $MgB_2$  بوساطة الهيدروجين السائل أو النيون السائل أو بوساطة دارة تبريد مغلقة رخيصة إلى حد ما يمكنها أن تصل بسهولة إلى ما دون 20 كلفن.

ولكن لكي تتحول هذه الروبية إلى واقع ينبغي أن تتوافر في المركب  $MgB_2$  خواص موصلية فائقة جيدة. ويولي الباحثون

الكهربائية دون خسارة، التي تستطيع نقل كثافة تيار أعلى بكثير مما تنقله الخطوط التي ليست فائقة الموصىلة. وحتى الآن اختبر الباحثون بنجاح عدة نماذج أساسها أكسيد النحاس مبردة بوساطة التتروجين السائل حتى الدرجة 70 كلفن تقريباً.

وبصورة عامة ينبغي، لكي تسلك المركبات سلوك الموصل الفائق في التطبيقات العملية، أن تبرد إلى درجات حرارة أخفض كثيراً من درجة حرارتها الحرجة  $T_c$ ، أي إلى ما بين 0.5 و  $0.7T_c$ : لأن التيارات الكهربائية الكبيرة أو الحقول المغناطيسيّة الشديدة تُخرب الموصىلة الفائقة بالقرب من الدرجة  $T_c$  ولذلك قد يلزم أن يُشغل موصل فائق عند درجة الحرارة 10 كلفن إذا كانت درجة

## تاريخ الموصليات الفائقة<sup>(\*)</sup>

كان صنعتها في البداية صعباً سواء في الشكل العالي للبقاء أو على شكل بلورة وحيدة، وهذا يجعل قياس خواصها الأساسية عسيراً. يضاف إلى ذلك أن تشكيل أسلال منها ليس بالأمر السهل، فالحببيات المفردة التي تشكل قطعة من أحد هذه الأكاسيد يجب أن تُنصف الواحدة منها بالنسبة إلى الأخرى لكي تكون للسلك خواص هندسية مفيدة، وهذا أمر مختلف عما هو الوضع عليه في حالة الموصلات الفائقة المعدنية. وقد جعلت هذه المشكلات الباحثين والمهندسين يراغبون في مادة تكون لها خواص الموصلات الفائقة المعدنية الأكثر سهولة، وتكون لها أيضاً درجة حرارة حرجة أعلى بشكل ملحوظ من الدرجة 20 كلفن. وهذا مع بزوج الآلفية الجديدة، أمكن التوصل للموصليات الفائقة بدرجات مختلفة من الصعوبة والتكلفة. ففي الأكاسيد كانت الموصليات الفائقة عملية بالقرب من الدرجة 77 كلفن، وهي الدرجة التي يمكن الوصول إليها بسهولة نسبية بغير المادة في الترويجين السائل. أما المواد المعدنية السابقة مثل ثلاثي نبوبيوم القصدير فكانت تُستخدم في المختبرات وك מגناط طبقة تعمل عند درجات الحرارة القريبة من 4 كلفن، وهي الدرجة التي يمكن بلوغها بوساطة الهليوم السائل.

كان اكتشاف أن المركب المعدني البسيط ثانوي بوريدي المغنزيوم، عام 2001، يتمتع بالموصليات الفائقة عند الدرجة 40 كلفن وهي ضعف درجة الحرارة للموصلات المعدنية الفائقة الأخرى بمذلة ما طلبه الأطباء (أو المهندسون في هذه الحالة) بالضبط.

اكتشف H.K. أونس الموصليات الفائقة في عام 1911 لدى استخدامه الهليوم السائل كمبرد لكي يدرس الخواص الكهربائية للمعادن في درجات الحرارة المنخفضة. وقد أدهش الجميع أن الزئبق حين بُرد إلى نحو 4.2 كلفن فقد فجأة كامل المقاومة الكهربائية. وتدعى هذه العتبة درجة الحرارة أو  $T_c$ .

ثم اكتشفت، ببطء ولكن بالتأكيد خلال العقود الخمسة الأولى من البحث في الموصليات الفائقة، مواد أخرى لها درجات حرارة حرجة أعلى. وكانت جميع هذه الموصلات الفائقة إما عناصر معدنية نقيّة أو مركبات معدنية (مكونة من معدنين أو أكثر). ولكن بدءاً من عقد السنتين وحتى منتصف الثمانينيات بدا وكأن قيمة الدرجة  $T_c$  لا تكاد ترتفع عن الدرجة 20 كلفن إلا قليلاً. تغير هذا كلّه في عام 1986 حين اكتشفت الموصليات الفائقة العالية درجة الحرارة في عدد وافر من المركبات التي أساسها أكسيد النحاس. وخلال السنوات القليلة الأولى بعد هذا الاكتشاف قفزت قيم الدرجة  $T_c$  إلى نحو 130 كلفن في مركب أكسيد - نحاس - كالسيوم - باريوم - زئبق. كان ذلك زمناً مثيراً إلى حد مذهل، لكن سرعان ما تبين أن النظرية الرئيسية حول كيفية ظهور الموصليات الفائقة - المعروفة باسم BCS [انظر الإطار في الصفحة 74] لا تفسر غياب المقاومة في هذه المواد، وعلى الرغم من مرور 20 سنة من بذل الجهد فلا توجد نظرية نهائية حول سبب أو كيفية حدوث الموصليات الفائقة في مركبات أكسيد النحاس.

تضاعف هذه المركبات أيضاً أمامنا مجموعة من التحديات الفيزيائية.



الدرجة التي يخرب فيها الموصليات الفائقة من أساسها)، وهكذا يصبح الهدف هو جعل مجال درجات الحرارة والحقول المغناطيسية، التي يبقى فيها الطور المختلط قائماً، أعظم ما يمكن. ولدرجة الحرارة أيضاً دور في هذه الأمور لأن الحقل الحرge الأعلى لموصلي فائق

الموصليات الفائقة بالحقل الحرge الأعلى، وهذه خاصية مهمة تحدد إلى أي حد يكون الموصلي الفائق مفيداً في الواقع العملي.

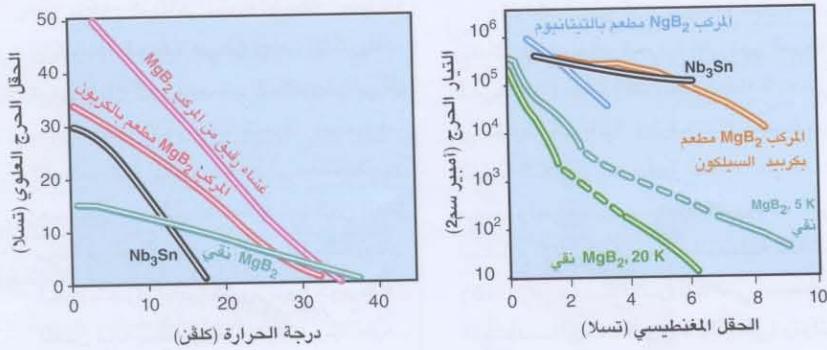
تتضمن معظم التطبيقات حقولاً متوسطة الشدة (أي يكون الحقل شديداً لدرجة تكفي لأن يكون مفيداً ولكنه ليس شديداً إلى

مميزات الموصليات الفائقة المفيدة. ومع ازدياد شدة الحقل المغناطيسي المطبق تزداد نسبة المادة التي تشغله الأنابيب التدفق حتى تترافق هذه الأنابيب بصورة كاملة، وعند هذا الحد تصبح المادة كلها ليست موصلة فائقة. ويُشار إلى شدة الحقل التي تزول عندها

A History of Superconductivity<sup>(\*)</sup>

تحسين الأداء<sup>(\*)</sup>

إن المحافظة على الموصولة الفائقة في حقل مغناطيسي ولدى مرور تيار هي أمر حاسم في التطبيقات. تبين البيانات المرسومة كيف أن التطعيم بالشوائب حسن أداء المركب  $MgB_2$ . فهو الآن يعادل، أو يتتفوق على أداء ثلاثي نيوبيوم القصدير  $Nb_3Sn$  المفضل في الصناعة. وبين الرسم البياني في اليسار أن قطع الأislak من المركب  $MgB_2$  المطعم بالكريبون وغشاء رقيق من المركب  $MgB_2$  الذي يحتوى على قدر غير معلوم من الشوائب يتمحملن حفلاً مغناطيسيًا (حفلًا حرًا عولياً) أشد مما يتحمله المركب  $Nb_3Sn$  عند جميع درجات الحرارة. أما البيانات في اليمين (المأخوذة عند الدرجة 4 كلفن تقريباً إلا إذا أشير إلى غير ذلك) فتبين أن المركب  $MgB_2$  المطعم بكربيد السيليكون  $SiC$  يعادل المركب  $Nb_3Sn$  في المقدرة على حمل التيار، لكن هذه المقدرة هي أقل بصورة ملحوظة لأشكال المركب  $MgB_2$  الأخرى. تمثل الخطوط المتقطعة استكمالات غير حقيقة تحرسها interpolations.



التحديات الرئيسية المتعلقة بجعل المركب  $MgB_2$  مادة فائقة الموصلية ذات فائدة. إن لكتافة التيار الحرج لمادة  $MgB_2$  المركب القيمة نفسها تقريباً كما لثلاثي نيوبيروم القصدير في حقول مغناطيسية منخفضة، لكن هذه القيمة تتناقص بسرعة أكبر بكثير في حقول أعلى. وهذا ليس بالطبع السار إذا كان الهدف هو استخدام المركب  $MgB_2$  في المغناطيس المصنوعة لتوليد حقل شديد. ومن ناحية أخرى حقق الباحثون خلال السنوات الأربع منذ اكتشاف الموصلية الفائقة في هذا المركب تحسينات كبيرة في كثافة التيار الحرج في كل من مجالى قيم الحقل الضعيف وكذلك، وبما الأهم، قيم الحقل الأعلى. والبحث في هذا الموضوع نشيط جداً، ويبعد أن الفيزيائيين سيحققون قريباً تحسينات أخرى وسيتوصلون إلى فهم أفضل لما يمكن أن يوفر موقع تثبيت جيدة في المركب  $MgB_2$ .

تيار يمكن أن يحمله الموصى الفائق دون أن يفقد انعدام مقاومته. فعند كثافات تيار أكبر من كثافة التيار الحرج تبدأ الدوامات (وهي المناطق الصغيرة من العينة التي لا تتصف بالمواصلية الفائقة) بالانزلاق أو بالحركة. وبمجرد أن تبدأ هذه المناطق بالحركة يحدث فقد في الطاقة - وهذا يعني أن للمادة مقاومة غير مدعومة. وتلتفي هذا الأثر يمكن تثبيت الدوامات بوساطة إدخال النوع المناسب من العيوب في الموصى الفائق. وغالباً يمكن زيادة تثبيت الدوامات بجعل البلورات الصغيرة (أو الحبيبات البلورية) في المادة أصغر، وهذا يزيد من مساحة سطح هذه الحبيبات، وبذلك تثبت الدوامات. وهناك طريقة أخرى لزيادة تثبيت الدوامات تتضمن إضافة شوائب مجهرية من مادة ثانية مثل أكسيد الإيتريوم أو شرائط بوريد التيتانيوم.

تشكل حالياً مسألة زيادة كثافة التيار الحر في حقول مغناطيسية أشد، أحد

يتغير مع تغيير درجة الحرارة. فما دون الدرجة  $T_c$  مباشرة تكون قيمة الحقل البحري الأعلى قريبة من الصفر - بمعنى أنه حتى أضعف الحقول يخرب الموصلية الفائقة. وعند درجات الحرارة الأكثر انخفاضا يمكن للموصلية الفائقة أن تقاوم حقولاً أشد [انظر الإطار في هذه الصفحة].

ولحسن الحظ يمكن تعديل الحقل الحرج الأعلى لمادة ما بوساطة التحكم في صنع المركب، يتم ذلك بصورة عامة بوساطة إضافة شوائب معينة. فعلى سبيل المثال حين نستبدل بعض البورون في المركب  $MgB_2$  بالكريون يتحسن الحقل الحرج الأعلى بصورة مذهلة. وقد أثبتت مجموعتنا، وكذلك آخرون، أن استبدال نحو 5% في المائة من البورون بالكريون يؤدي إلى زيادة الحقل الحرج الأعلى إلى أكثر منضعف. وهذا تحسين مذهل ومهم في العينات الحجمية.

إضافة إلى ذلك أثبتت مجموعة

إضافة إلى ذلك أثبتت مجموعة C.D> لاريلستير [من جامعة ويسكونسن - ماديسون] أن لاغشية رقيقة من المركب  $MgB_2$  قيما مرتفعة للحقل الحرج الأعلى، حتى إنها أعلى بكثير من تلك التي لثلاثي نيوبيوم القصدير ( $Nb_3Sn$ ). ويلاحظ في البيانات الخاصة بالأغشية الرقيقة غموض أساسى: ما الذى سبب هذه القيم العالية؟ هل هو وجود كميات صغيرة من الأكسجين؟ أم هو عنصر آخر يتسلل إلى داخل المادة ويطعّمها بطريقة لا نعرفها؟ أم هو الإجهاد في بنية المركب  $MgB_2$  عندما يكون على شكل أغشية رقيقة؟ ولكن مما كانت الأرجوحة عن هذه الأسئلة فمن الواضح أن المركب  $MgB_2$  هو مادة واعدة بالنسبة إلى المغناط الفائقة لموصليّة التي يمكن أن تشغّل عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً وربما أيضاً في حقول شد من تلك التي يعمل فيها ثلاثي نيوبيوم قصدير الذي هو المركب المفضل حالياً صنع هذه المغناط.

والخاصة الثانية للموصليات الفائقة  
الأهمية في الفيزياء التطبيقية، هي كثافة  
التيار الحرج. إذ يعين هذا المقدار أعظم

## تنبؤات نظرية BCS (\*)

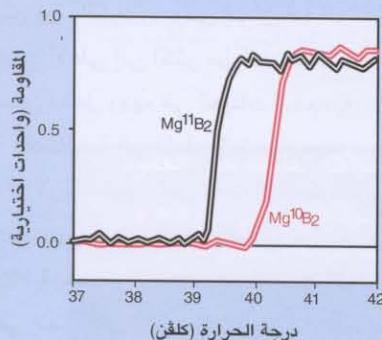
اقتصر الفيزيائيون [ـ جل. باردينـ](#) و [ـ R. شريفرـ](#) عام 1957 تفسيراً لآلية الموصولة الفائقة في المعادن في نظرية تحمل الأحرف الأولى من اسمائهم. ففي معدن عادي لا يتصف بالموصلية الفائقة تتبعز الإلكترونات بسبب العيوب ويولد ذلك مقاومة. وحسب النظرية BCS تحدث الموصولة الفائقة حين تصبح الإلكترونات كأنها جسم واحد متصل يستطيع الحركة بشكل جماعي دون أن يتبعثر.

وتكون اللبنات المكونة لهذه الحالة الإلكترونية الجديدة هي أزواج من الإلكترونات، تدعى أزواج كوير، يجذب الإلكترونات في كل منها أحدهما الآخر جذباً ضعيفاً. ويحدث هذا التجاذب، الذي يبدو للوهلة الأولى مستحيلاً، بين جسيمين متماثلي الشحنة بسبب كون المعدن مؤلفاً من أيونات مشحونة إيجاباً وإلكترونات، فحين يتحرك أحد الإلكتروني زوج كوير خلال المعدن فإنه يخلف وراءه تشوشاً أيونيّاً موجباً الشحنة يتبعه، وهذه الشحنة الموجبة المنطلقة بسرعة تجذب الإلكتروناً ثانياً. وبهذه الطريقة يقفر تشوہ الشبکیة الإلكترونات ببعضها بصورة ضعيفة. (وعلى نحو أكثر دقة، تسهم في الاقتران اهتزازات شبکیة ذات تواتر معين). وهناك تشبيه فج هو تقافز ولدين فوق غطاء متين مشدود، فمع أنه لا يوجد تجاذب مباشر بين الولدين إلا أنهما يميلان إلى القفز أحدهما باتجاه الآخر بسبب التشوہ الذي يحدثه الواحد منها في الغطاء المشدود تحت أقدامهما.



يُؤدي تشكيل أزواج الإلكترونات المعروفة بازوج كوير (في الأعلى) في النهاية إلى الموصولة الفائقة. وحين يتحرك أحد الإلكترونات يترك خلفه تشوشاً في الشبكة المؤلفة من أيونات موجبة في المعدن (الصورة اليسرى). وسرعان ما ينجذب الإلكترون الثاني بوساطة تركيز الشحنة الموجبة الناشئ (الصورة اليمنى). يكون تجاذب الإلكترونين، في الواقع، ضعيفاً.

له درجة حرارة حرجة  $T_c$  عالية بسبب الخاصية الثالثة وهي زيادة قوة الترابط بين الإلكترون والشبكة.



تهبط المقاومة الكهربائية للمركب  $MgB_2$  إلى الصفر لدى تبريده إلى ما دون درجة حرارته الحرجة البالغة نحو 40 كلفن. وتختلف درجة الحرارة الحرجة للعينات المصنوعة من البورون 10 المقاييس عن تلك التي للعينات المصنوعة من البورون 11 التقى. وهذا الانحراف التخليري الواضح تتنبأ به النظرية BCS ولذلك فهو يدل على أن الموصولة الفائقة في المركب  $MgB_2$  هي موصولة فائقة تقييدية من النوع BCS.

وتراكب أزواج كوير بعضها فوق بعض وتشكل عند درجات الحرارة التي دون الدرجة  $(T_c)$  حالة إلكترونية متصلة لا تعاني أي مقاومة كهربائية. ويتوسع شكل مبسط من النظرية BCS أن الدرجة  $T_c$  تعتمد على ثلاثة من خواص المادة: عدد الإلكترونات التي تستطيع الإسهام في حالة الموصولة الفائقة (كما زاد عدد الإلكترونات التي تستطيع المساعدة كانت الدرجة  $T_c$  أعلى) وتواتر اهتزازات الشبكة التي تعمل على ترابط الإلكترونات وتشكيل أزواج كوير (كما كان التواتر أعلى كانت الدرجة  $T_c$  أعلى) وقوة الترابط بين تشوہ الشبکیة والإلكترونات (كما كانت قوة الترابط أكبر كانت الدرجة  $T_c$  أعلى). وخلال عقود تركز السعي للحصول على قيم الدرجة  $T_c$  عالية على الوصول إلى القيمة العظمى لتتأثير هذه الخواص الثلاث المتعلقة بعضها بعض، مع تفضيل محاولة تحسين الخصائص الأوليين. أما المركب  $MgB_2$  فيبدو أن

الحقل المغناطيسي وكثافة التيار اللذين تكون فيما هذه المادة مفيدة. لقد تحسنت الخواص بين درجتي الحرارة 20 و 30 كلفن إلى الحد الذي يbedo معه أن التطبيقات التي تعتمد على كثافة التيار العالية، مثل المغناط، يمكن أن تجري إما باستخدام مبردات مثل الهدروجين السائل أو النيون السائل، أو باستخدام برادات ذات دارة مغلقة. وصنعت نماذج أولية من أسلاك مغلفة بل وصنعت بعض المغناط الأولية،

للمركبات المعدنية التي يحتمل أن تكون موصولة فائقة. ولكن في مسيرة البحث عن مواد وخصائص جديدة لا يزال صوت الطبيعة، لحسن الحظ، يمكن أن يسمع على الرغم من الرغب من الجلة التي تحذثها أحکامنا السابقة. خلال السنوات الأربع الماضية تطور فهم البشر للموصولة الفائقة في المركب  $MgB_2$  بسرعة مذهلة. ولدينا الآن فكرة واضحة عن خواص المركب  $MgB_2$  العالي النقاء، ونحن نتعلم كيف نحور هذه المادة لكي توسيع مجالـ

## الماضي والحاضر والمستقبل (\*\*)

يُعد اكتشاف الموصولة الفائقة في المركب  $MgB_2$  ثمرة عقود من البحث المركـز وفي الوقت نفسه تذكـير قوي بأن الطبيعة لا تبالـي دائمـاً بالخبرة العملية التي نجنيـها خلال محاولاتـنا، العـقـيمـةـ فيـ كـثـيرـ منـ الأـحـيـانـ، لـوـصـفـهاـ. وـمـعـ أنـ وجودـ المـرـكـبـ  $MgB_2$  كانـ معـروـفاـ منـذـ نـحوـ خـمـسـيـنـ سـنـةـ لـكـنـهـ لمـ يـخـتـرـ قـطـ كـمـوـصـلـ فـائقـ وذلكـ، إـلـىـ حدـ ماـ، لـأـنـهـ لمـ يـتـفـقـ معـ تـصـورـناـ

## البنية والروابط<sup>(\*)</sup>

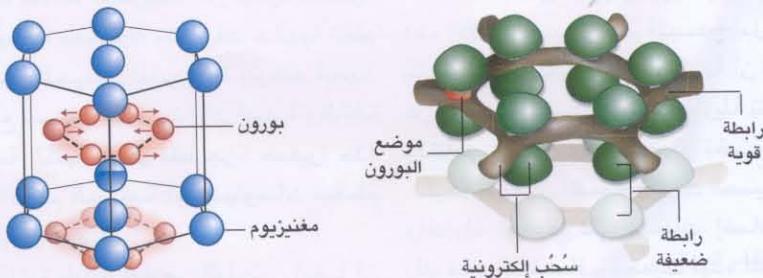
أن تشكل هذه الأنابيب منظومة قرية (تبريدية) cryogenic لكيابلات نقل الكهرباء دون فقد المصنوعة من المركب  $MgB_2$  والتي تحتل جزءاً من المكان داخل العزل الحراري. ومع أن مثل هذه المنظومة تتحدى بأنها أقرب إلى الخيال العلمي منها إلى الواقع الهندسي، إلا أنها اقتُرحت لكي تدرس بصورة جديدة.

بعد اكتشاف أول موصل فائق على أساس أكسيد النحاس وجد الباحثون عدداً كبيراً جداً من أكسيد النحاس الفائق الموصلية. إلا أنه بعد أربع سنوات من اكتشاف المركب  $MgB_2$  لم يعثر حتى الآن على مركبات أخرى ذات صلة تكون درجة حرارتها الحرجة عالية بصورة غير عادية. لقد كان اكتشاف الموصلية الفائق في الأكسيد مماثلاً لاكتشاف قارة جديدة كاملاً (ذات امتدادات واسعة رهن الاستكشاف) في حين كان اكتشاف الموصلية الفائق في المركب  $MgB_2$  أشبه باكتشاف جزيرة نائية في أرخبيل معروف تماماً. ونحن لا نعرف ما إذا كان هذا هو آخر أعضاء السلسلة أم لا تزال هناك مفاجأة أخرى تنتظرنا.

■ Structure and Bonding (\*)

إن أحد الأسباب الرئيسية لارتفاع درجة حرارة التحول للمركب  $MgB_2$  ارتفاعاً مدهشاً هو قوة التأثير بين الإلكترونات معينة واهتزازات شبيكية معينة. ينشأ هذا التأثير القوي بسبب بنية المادة والروابط. ذرات البورون في المركب  $MgB_2$  تكون شكلًا سادسياً كخلية قرص العسل (الأحمر، في اليسار). تكون هذه الطبقات في المركب  $MgB_2$  مفصولة بطبقات من المغنتيزيوم (الأسود). والإلكترونات المسئولة عن الموصلية الكهربائية العادي، وعن الموصلية الفائقة، متراوحة مع طبقات البورون وهي تشتهر في واحد من نوعين من الروابط في المادة (في اليمين). ويحدث إلكترونات التوصيل في روابط المستوى تأثيراً قوياً جداً باهتزازات الشبكة داخل المستوى (الأسهم، في اليسار) وتنتهي من هذا التأثير الشديد أو الاقتران، حالة تبقى موصلة فائقة في درجات حرارة عالية.

لقد أعاد المركب  $MgB_2$  إلى الحياة سؤالاً مثيراً أساسياً جداً في الفيزياء: هل يمكن أن تكون للموصل الفائق موصلية فائقة تتضمن مجموعتين مختلفتين من الإلكترونات (الأخضر والذهبي) تشكلان بحرين مختلفين من أزواج كوبير؟ تشير الأدلة التجريبية إلى أن هذا هو الوضع في المركب  $MgB_2$  الذي يمكن أن يكون المثال الواضح الأول على هذه الظاهرة.



### المؤلفان

Paul C. Canfield - Sergey L. Bud'ko

يعمل كل منهما في قسم الطاقة بمختبر Ames بولاية آيوا. إضافة إلى ذلك فإن كانفيلد هو أستاذ الفيزياء والفلك في جامعة آيوا. تتركز بحوثه على تصميم وإكتشاف وتطوير وتوسيع مواد وظواهر جديدة، وبالدرجة الأولى يركز على الحالات الإلكترونية والمغنتيسية في درجات الحرارة المنخفضة للمركبات العدية. أما اهتمامات بودكو البحثية فهي تشمل الخواص الترموديناميكية والمغنتيسية وخواص النقل للمواد الجديدة، وكذلك الاهتزازات الكهرومagnetism الكهرومغناطيسية في المعادن وأشباه المعادن؛ والخواص الفيزيائية للمواد وهي في ظروف متطرفة من الضغط العالي والحقن المغنتيسي الشديد ودرجة الحرارة المنخفضة. يسجل المؤلفان شكرهما وامتنانهما لجامعة من الباحثين لتعاونهم المثمر. دعم البحث من قبل مدير أبحاث الطاقة التابع لكتب علم الطاقة الأساسية.

### مراجعة للاستزادة

**Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride.** Jun Nagamatsu et al. in *Nature*, Vol. 410, pages 63–64; March 1, 2001.

**Magnesium Diboride: One Year On.** Paul C. Canfield and Sergey L. Bud'ko in *Physics World*, Vol. 15, No. 1, pages 29–34; January 2002.

**Energy for the City of the Future.** Paul M. Grant in *Industrial Physicist*, Vol. 8, No. 1, pages 22–25; February/March 2002. Available at [www.alp.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf](http://www.alp.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf)

**Magnesium Diboride: Better Late than Never.** Paul C. Canfield and George W. Crabtree in *Physics Today*, Vol. 56, No. 3, pages 34–40; March 2003.

**Superconductivity in  $MgB_2$ : Electrons, Phonons and Vortices.** Edited by Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko and Paul C. Canfield. *Physica C*, Vol. 385, Nos. 1–2; March 2003.

لكن الأمر مازال يحتاج إلى المزيد من العمل لفهم طرق تعدين الموصل الفائق والوصول بخواصه إلى درجة تقارب من الكمال، وكذلك لمعرفة المواد المحتملة لتغليف الأسلاك.

وعلى العموم يبدو أن المستقبل واعد تماماً فيما يتعلق بالمركب  $MgB_2$ . وبالفعل إذا حدث انتقال باتجاه اقتصاد يعتمد على الهيدروجين فإن المركب  $MgB_2$  يمكن أن يحتل مكاناته الملائمة عندئذ. فإذا كان ينبغي إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين، في مفاعلات صغيرة ذات قاعدة حصوية على سبيل المثال [انظر: «الجبل التالي من الطاقة النووية»، *العلوم*، العددان 6/5 (2002)، ص 4] فسيكون من الضروري نقله بوساطة أنابيب معزولة لنقل السوائل تحافظ على درجة حرارة أدنى من 20 كلفن التي هي نقطة غليان الهيدروجين. ويمكن